

ISSN 2518-1726 (Online),
ISSN 1991-346X (Print)

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

ӘЛЪ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ
ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

AL-FARABI KAZAKH
NATIONAL UNIVERSITY

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА СЕРИЯСЫ



СЕРИЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ



PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

3 (319)

МАМЫР – МАУСЫМ 2018 ж.

МАЙ – ИЮНЬ 2018 г.

MAY – JUNE 2018

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

Б а с р е д а к т о р ы
ф.-м.ғ.д., проф., ҚР ҰҒА академигі **Ғ.М. Мұтанов**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

Жұмаділдаев А.С. проф., академик (Қазақстан)
Кальменов Т.Ш. проф., академик (Қазақстан)
Жантаев Ж.Ш. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Өмірбаев У.У. проф. корр.-мүшесі (Қазақстан)
Жүсіпов М.А. проф. (Қазақстан)
Жұмабаев Д.С. проф. (Қазақстан)
Асанова А.Т. проф. (Қазақстан)
Бошқаев К.А. PhD докторы (Қазақстан)
Сұраған Д. корр.-мүшесі (Қазақстан)
Quevedo Hernando проф. (Мексика),
Джунушалиев В.Д. проф. (Қырғыстан)
Вишневский И.Н. проф., академик (Украина)
Ковалев А.М. проф., академик (Украина)
Михалевич А.А. проф., академик (Белорус)
Пашаев А. проф., академик (Әзірбайжан)
Такибаев Н.Ж. проф., академик (Қазақстан), бас ред. орынбасары
Тигиняну И. проф., академик (Молдова)

«ҚР ҰҒА Хабарлары. Физика-математикалық сериясы».

ISSN 2518-1726 (Online), ISSN 1991-346X (Print)

Меншіктенуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» РҚБ (Алматы қ.)
Қазақстан республикасының Мәдениет пен ақпарат министрлігінің Ақпарат және мұрағат комитетінде
01.06.2006 ж. берілген №5543-Ж мерзімдік басылым тіркеуіне қойылу туралы куәлік

Мерзімділігі: жылына 6 рет.
Тиражы: 300 дана.

Редакцияның мекенжайы: 050010, Алматы қ., Шевченко көш., 28, 219 бөл., 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,
www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы, 2018

Типографияның мекенжайы: «Аруна» ЖК, Алматы қ., Муратбаева көш., 75.

Главный редактор
д.ф.-м.н., проф. академик НАН РК **Г.М. Мутанов**

Редакционная коллегия:

Джумадильдаев А.С. проф., академик (Казахстан)
Кальменов Т.Ш. проф., академик (Казахстан)
Жантаев Ж.Ш. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Умирбаев У.У. проф. чл.-корр. (Казахстан)
Жусупов М.А. проф. (Казахстан)
Джумабаев Д.С. проф. (Казахстан)
Асанова А.Т. проф. (Казахстан)
Бошкаев К.А. доктор PhD (Казахстан)
Сураган Д. чл.-корр. (Казахстан)
Quevedo Hernando проф. (Мексика),
Джунушалиев В.Д. проф. (Кыргызстан)
Вишневский И.Н. проф., академик (Украина)
Ковалев А.М. проф., академик (Украина)
Михалевич А.А. проф., академик (Беларусь)
Пашаев А. проф., академик (Азербайджан)
Такибаев Н.Ж. проф., академик (Казахстан), зам. гл. ред.
Тигиняну И. проф., академик (Молдова)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая».

ISSN 2518-1726 (Online), ISSN 1991-346X (Print)

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)
Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов
Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.
Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,
www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2018

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

E d i t o r i n c h i e f
doctor of physics and mathematics, professor, academician of NAS RK **G.M. Mutanov**

E d i t o r i a l b o a r d:

Dzhumadildayev A.S. prof., academician (Kazakhstan)
Kalmenov T.Sh. prof., academician (Kazakhstan)
Zhantayev Zh.Sh. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Umirbayev U.U. prof. corr. member. (Kazakhstan)
Zhusupov M.A. prof. (Kazakhstan)
Dzhumabayev D.S. prof. (Kazakhstan)
Asanova A.T. prof. (Kazakhstan)
Boshkayev K.A. PhD (Kazakhstan)
Suragan D. corr. member. (Kazakhstan)
Quevedo Hernando prof. (Mexico),
Dzhunushaliyev V.D. prof. (Kyrgyzstan)
Vishnevskiy I.N. prof., academician (Ukraine)
Kovalev A.M. prof., academician (Ukraine)
Mikhalevich A.A. prof., academician (Belarus)
Pashayev A. prof., academician (Azerbaijan)
Takibayev N.Zh. prof., academician (Kazakhstan), deputy editor in chief.
Tiginyanu I. prof., academician (Moldova)

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.

ISSN 2518-1726 (Online), ISSN 1991-346X (Print)

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,
www.nauka-nanrk.kz/physics-mathematics.kz

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2018

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 3, Number 319 (2018), 153 – 159

UDC 533.93

T.S. Ramazanov¹, S.K. Kodanova¹, N.Kh. Bastykova¹, A. Tikhonov², S.A. Maiorov³

¹IETP, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan;

²School of Science and Technology, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan;

³General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ramazan@physics.kz

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC PROPERTIES OF HOT DENSE PLASMA

Abstract. In this work hydrodynamic properties of hot dense plasma bunch have been studied in terms of their application to the problem of inertial confinement fusion. The two-temperature hydrodynamic equations taking into account the electron thermal conductivity and kinetics of the charge composition are presented. The following model problems are considered: expansion of a plasma bunch in the vacuum, compression of the plasma by shock waves, on the role of the electronic thermal conductivity in compression of the plasma bunch by shock waves, interaction of the plasma bunch with a laser and a beam of heavy ions. On the basis of the developed numerical methods the test problems arising in the problem of inertial confinement fusion are analyzed. The results shows that the expansion wave tail of the electron temperature is much higher than the ion as time energy exchange between electrons and ions is proportional to the ratio of their masses. In the case of a spherical geometry in passing of the shock wave to the center, reaching the center several times and reflected from it, and a dense layer of the ablator, resulting in a significant increase in density and temperature.

Key words: Hot dense plasma, Hydrodynamic model, Shock wave, Two-temperature plasma, The target for inertial confinement fusion, Compression by shock waves.

УДК 533.93

Т.С. Рамазанов¹, С.К. Коданова¹, Н.Х. Бастыкова¹, А. Тихонов², С.А. Майоров³

¹НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

²Школа Наук и Технологий, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан;

³Институт общей физики РАН, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СГУСТКА ПЛОТНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ

Аннотация. В данной работе исследованы гидродинамические свойства сгустка плотной горячей плазмы применительно к проблеме инерциального термоядерного синтеза. Приведены уравнения двухтемпературной гидродинамики с учетом электронной теплопроводности, кинетики зарядового состава. Рассмотрены модельные задачи: разлет плазменного сгустка в вакуум, сжатие плазмы ударными волнами, о роли электронной теплопроводности при сжатии сгустка плазмы ударными волнами, взаимодействие сгустка плазмы с лазерным излучением и пучком тяжелых ионов. На основе разработанных численных методов получены и проанализированы тестовые задачи, возникающие в проблеме инерциального термоядерного синтеза. Результаты показывают, что в хвосте волны разрежения электронная температура значительно превышает ионную, так как время обмена энергии между ионами и электронами велико из-за большого отношения их масс. А также, в случае сферической геометрии, при прохождении ударной волны к центру, она, достигая несколько раз центра и отражаясь от него и плотного слоя аблятора, приводит к значительному повышению плотности и температуры.

Ключевые слова: Плотная горячая плазма, Гидродинамическая модель, Ударная волна, Двухтемпературная плазма, Мишени для инерционного термоядерного синтеза, Сжатие ударными волнами.

Введение. На сегодняшний день в мире проводится большое количество теоретических и экспериментальных исследований в области инерционного термоядерного синтеза (ИТС) [1, 2]. Из-за сложностей в проведении экспериментов с полномасштабным управляемым термоядерным взрывом очень широко используются методы вычислительного эксперимента [3-5]. Среди них модели на основе уравнений гидродинамики являются разумным компромиссом между точностью модели и сложностью получения численного решения [6-8].

В данной работе используется гидродинамическая модель двухтемпературной плазмы в условиях инерционного термоядерного синтеза [2]. Рассматриваемая задача связано с энерговыделением лазерного излучения в твердотельный слой металла (иногда - пластика), окружающего дейтерий-тритиевый газ – это слой т.н. аблятора. В нем образуется плазма многозарядных ионов с неравновесным ионным составом, разлет которой определяет важнейший для термоядерного синтеза параметр удержания - произведение радиуса дейтерий-тритиевого сгустка на его плотность.

Свойства плотной горячей плазмы, получаемой на этом этапе поджига термоядерной мишени, в рамках гидродинамической модели изучаются на примере нескольких самостоятельных задач. В каждой из них на основе численного эксперимента рассмотрены следующие упрощенные физические системы.

Первая из них, это разлет плотного горячего сгустка в вакуум. Здесь представляет интерес сравнение с точными решениями - волной разрежения, исследование кинетических свойств многозарядной плазмы - нарушение ионизационного равновесия (закалка ионного состава) [9].

Вторая задача связана с более сложным гидродинамическим явлением - ударными волнами в двухтемпературной плазме [9]. Здесь важную роль играют отрыв ионной и электронной температур и волна электронной теплопроводности.

В третьей задаче рассмотрен случай воздействия мощного лазерного импульса на плотную оболочку из золота, ограничивающую смесь дейтерия с тритием. В ней сжатие дейтериево-тритиевой смеси происходит за счет разлета внешней оболочки, и также важную роль играют волна электронной теплопроводности и ударная волна, распространяющиеся внутрь мишени.

2. Постановка задачи

В случаях плоской, цилиндрической или сферической симметрии ($n=0, 1, 2$) система уравнений газовой динамики в лагранжевых координатах с учетом кинетических явлений (вязкость, теплопроводность, неравновесность ионного состава и различие температур ионов и электронов, вклад неупругих процессов ионизации, рекомбинации и потерь на излучение в энергобалансе электронов) имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial}{\partial s} (r^n u), \quad u = \frac{\partial r}{\partial t}, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = r^n \frac{\partial p}{\partial s} + F_{vis}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} = -p_i \frac{\partial}{\partial s} (r^n u) + (Q_{\Delta T} - Q_{viscosity}) / \rho - \frac{\partial}{\partial s} (r^n q_i), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_e}{\partial t} = -p_e \frac{\partial}{\partial s} (r^n u) + (-Q_{\Delta T} - Q_{viscosity} + Q_{non elastic}) / \rho - \frac{\partial}{\partial s} (r^n q_e), \quad (3)$$

$$p_e = N_e T_e = \frac{z}{m_i} \rho T_e, \quad p_i = N_i T_i = \frac{\rho}{m_i} T_i \quad (4)$$

Эта система уравнений должна быть дополнена уравнениями кинетики ионного состава. Уравнения баланса для описания ионного состава многозарядной плазмы имеют вид:

$$\frac{\partial y^{(z)}}{\partial t} = \Gamma^{(z)} / N_i, \quad z = 1, 2, \dots, z_{max} \quad (5)$$

здесь $y^{(z)} = N^{(z)} / N_i$ - относительная концентрация ионов с кратностью ионизации z , z_{max} - максимальная степень ионизации

$$\Gamma^{(1)} = \beta^{(1)} N_e^2 N^{(2)} - S^{(1)} N_e N^{(1)}, \quad (6a)$$

$$\Gamma^{(z)} = \beta^{(z)} N_e^2 N^{(z+1)} - S^{(z)} N_e N^{(z)} - \beta^{(z+1)} N_e^2 N^{(z)} + S^{(z-1)} N_e N^{(z-1)}, \quad z = 2, 3, \dots, z_{\max} - 1 \quad (6б)$$

$$\Gamma^{(z_{\max})} = -\beta^{(z_{\max}-1)} N_e^2 N^{(z_{\max})} + S^{(z_{\max}-1)} N_e N^{(z_{\max}-1)}, \quad (6в)$$

Здесь $\beta^{(z)}$ - коэффициент рекомбинации электрона и иона $z+1$; $S^{(z)}$ - коэффициент ионизации иона z . Эти величины зависят от иона z и являются функциями N_e и T_e .

Эта система уравнений должна быть дополнена уравнениями переноса лазерного излучения, а в соответствующем случае и пучка тяжелых ионов. Обозначения в приведенных уравнениях общепринятые, для решения этой системы уравнений использовался метод расщепления по физическим процессам (более подробно см. [2]).

3. Разлет плазменного сгустка в вакуум

После воздействия лазерного излучения на сферическую термоядерный мишень, она представляет собой сгусток плотной горячей плазмы. Рассмотрим асимптотических характеристик свободного разлета сгустка плотной горячей двухтемпературной плазмы, последующий разлет этого сгустка в вакуум. Решение этой задачи представляет самостоятельный интерес с точки зрения отработки численной методики и исследования

На рисунке 1 представлены распределения скорости, плотности плазмы и температуры электронов в различные моменты времени. Из рисунка 1(а) видно, что распределение скорости линейно по координате, как и это следует из известного решения задачи Римана о центрированной волне разрежения [10]. Волна разрежения движется со скоростью звука по сгустку, а после достижения его центра, плотность в центре сгустка монотонно падает (рисунок 1(б)). В соответствии с уравнением адиабаты $p / \rho^\gamma = const$, аналогичным образом ведут себя температуры ионов и электронов.

На рисунке 2 для случаев плоской, цилиндрической и сферической симметрии представлены зависимости плотности и температуры в центре сгустка от времени. Видно, что в случае сферической симметрии, как следовало ожидать, ее плотность и температура падают наиболее быстро.

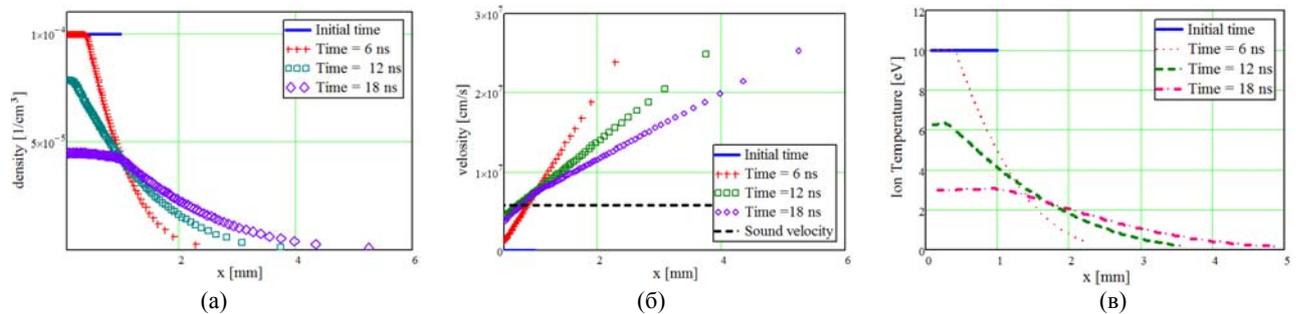


Рисунок 1 - Разлет плазменного сгустка в вакуум: распределение плотности плазмы (а), скорости плазмы (б), температуры ионов (в) в различные моменты времени

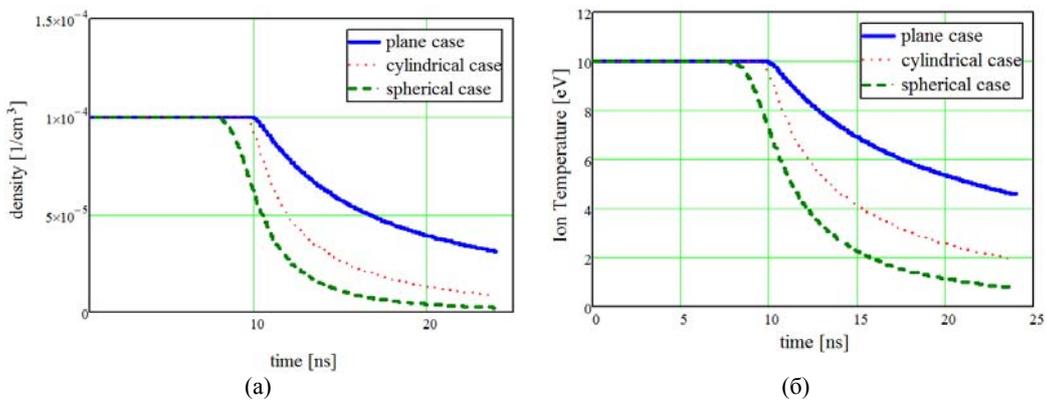


Рисунок 2 - Зависимости плотности (а) и температуры центра сгустка (б) от времени для трех видов геометрии: плоский, цилиндрический, сферический

4. Исследование сжатия сгустка плазмы ударными волнами

Рассмотрим процесс сжатия первоначально покоящегося сгустка плазмы ударными волнами в двух случаях: в плоском и сферический симметричном. В первом случае рассматривается плоский сгусток, а в другом - сферический. Рассмотрим вначале постановку задачи для плоского сгустка.

Пусть левая и правая границы этого первоначально покоящегося слоя начинают двигаться со скоростью $v_{abliator} > 0$ и $-v_{abliator}$, соответственно. Такая постановка задачи соответствует тому, что сгусток плазмы сжимается массивным слоем аблятора, который окружает дейтерий-тритиевую смесь. В силу симметрии задачи можно рассматривать только половину слоя. На оси симметрии будем задавать условие равенства нулю всех потоков (производных по координате для плотности, скорости и температур ионов и электронов).

На рисунке 3 представлены результаты расчетов зависимости распределение плотности, скорости и температуры в различные моменты времени для правой части плоского слоя, центр которого выбран центр оси координат. Из рисунка видно, что в соответствии с известным решением задачи Римана о распаде произвольного разрыва, в нашем случае, внутрь сгустка плазмы идут ударные волны с левой и правой границы.

Ударная волна, дойдя до центра сгустка и столкнувшись там со встречной волной, отражается от нее и далее в виде отраженной волны идет навстречу аблятору. Аблятор здесь играет роль бесконечно тяжелого, жесткого поршня, сжимающего газ. Дойдя до поршня, ударная волна отражается от него и снова идет к центру сгустка. Это повторяющаяся картина сжатия сгустка ударными волнами соответствует сжатию дейтерий-тритиевую мишени слоем аблятора.

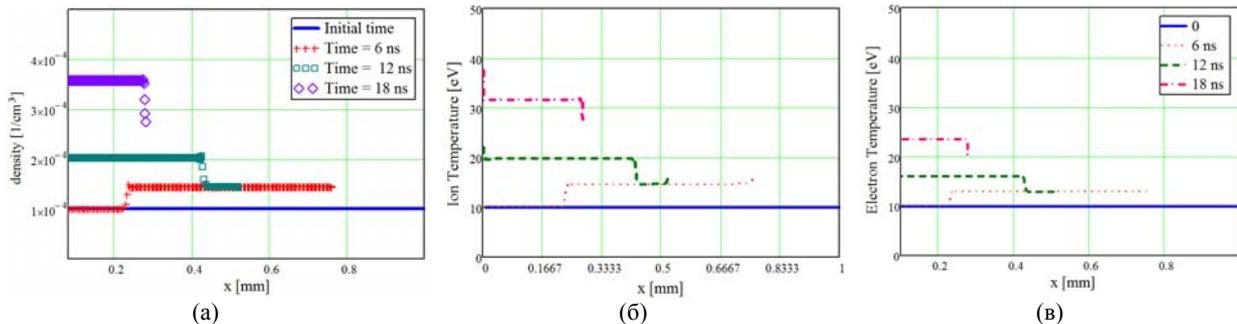


Рисунок 3 - Сжатие сгустка горячей плотной плазмы: распределение плотности плазмы (а), температуры ионов (б), температуры электронов (в) в моменты времени 6, 12, 18 нс

На рисунке 4 представлены аналогичные распределения для случая сферической симметрии. Только в данном случае, в отличие от плоской симметрии, картина взаимодействия ударной волны со своим образом на оси симметрии меняется на картину сходящейся к центру сферы ударной волны. В силу симметрии производные по радиусу в центре сферы тоже полагаются равными нулю.

Такого рода решения исследовались в задачах о сжатии ударной волны в конических мишенях, где вблизи центра в математической постановке возникала сингулярность, а в экспериментах с воздействием лазерного излучения из точки схождения ударной волны фиксировался выход нейтронов [6].

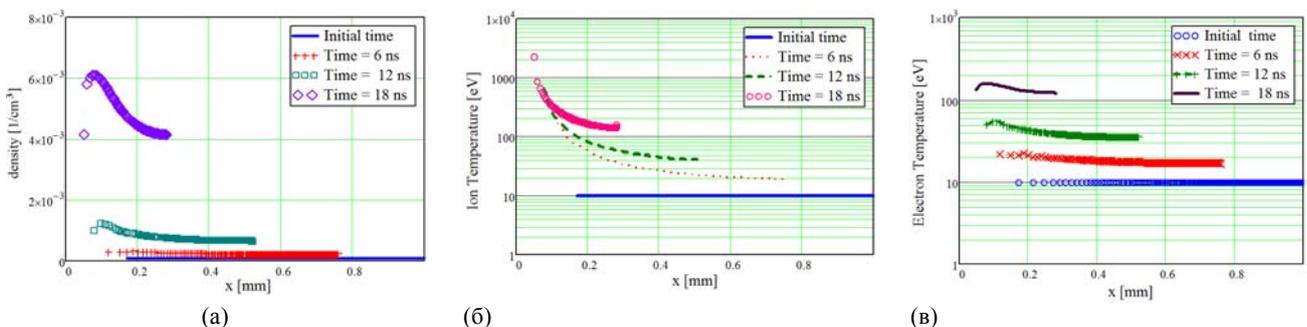


Рисунок 4 - Сжатие сферического сгустка горячей плазмы ударными волнами: распределение плотности плазмы (а), температуры ионов (б), температуры электронов (в) в моменты времени 6, 12, 18 нс

5. О роли электронной теплопроводности при сжатии сгустка плазмы ударными волнами

Важную роль при описании воздействия потоков энергии на плотную горячую плазму играет электронная теплопроводность. Продемонстрируем это влияние на примере задачи предыдущего параграфа о сжатии плоского сгустка плазмы ударными волнами. Для того, чтобы увеличить степень влияния электронной теплопроводности, уменьшим в 10000 раз плотность плазмы. На рисунке 5 представлены соответствующие результаты расчетов распределений температуры ионов и электронов. Из рисунка видно, что в случае высокой теплопроводности электронная температура практически одинакова по всему сгустку, а на фронте ударной волны имеется отрыв температуры ионов от электронов, соответствии с известным решением задачи о структуре фронта ударной волны в плазме.

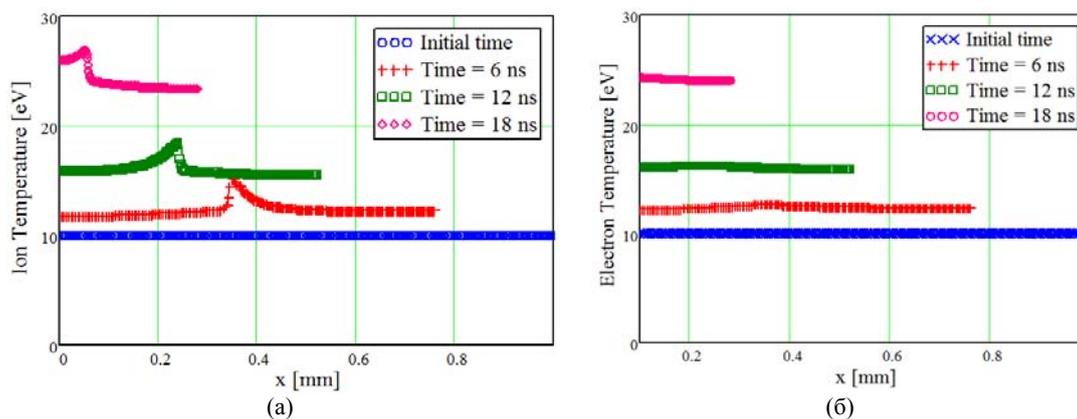


Рисунок 5 - Сжатие плазмы в режиме высокой теплопроводности температуры ионов (а), температуры электронов (б) в различные моменты времени

6. Учет разогрева плазмы лазерным излучением

Рассмотрим взаимодействие лазерного излучения с мишенью, состоящий из дейтерий-третиевой смеси, которая окружена двухслойной оболочкой, состоящий из слоя дейтерий-третиевого льда и тонкого слоя золота. Роль оболочки сводится к тому, что при облучении мишени лазером она испаряется и обжимает (аналогично поршню) дейтерий-третиевую смесь.

Схема физического процесса представляется такой, что поскольку плотность электронов в оболочке превышает критическую, то все лазерное излучение поглощается в ней. Таким образом, на начальной стадии образуется горячая плотная оболочка, масса которой составляет значительную часть массы всей мишени. Далее это оболочка распадается на две части. Одна часть разлетается в вакуум, образуя волну разрежения, а другая часть идет внутрь, образуя сходящуюся к центру ударную волну. В этом случае она играет роль поршня, который, сжимает дейтерий-третиевое ядро мишени.

В случае сферической геометрии, при прохождении ударной волны к центру, она, достигая несколько раз центра и отражаясь от него и плотного слоя аблятора, приводит к значительному повышению плотности и температуры.

На рисунках 6а - 6б приведены значения всех соответствующих гидродинамических параметров: на рисунке 6а приведены распределения плотности в различные моменты времени. В начальный момент времени имеется покоящийся дейтерий-третиевый газ с плотностью 10^{-4} г/см³ и на границах слой дейтерий-третиевого льда с плотностью 0,25 г/см³ и слой аблятора с плотностью 0,5 г/см³. Из рисунка видно, что в центр идет слабая ударная волна. В распределении скорости (рисунок 6б) волна разрежения соответствует линейной зависимости скорости от координаты, а волна сжатия, т.е. ударная волна, идет внутрь.

На рисунке 7 показаны температура электронов и ионов в моменты времени 0,06 нс, 0,12 нс, 0,18 нс. При прохождении фронта ударной волны температура ионов резко увеличивается, и ее значение испытывает разрыв на скачке плотности.

На рисунке 7(в) приведены температуры электронов и ионов в момент времени 0,18 нс с целью демонстрации их поведения. Из рисунка видно, что в хвосте волны разрежения электронная

температура значительно превышает ионную, так как время обмена энергии между ионами и электронами велико из-за большого отношения их масс.

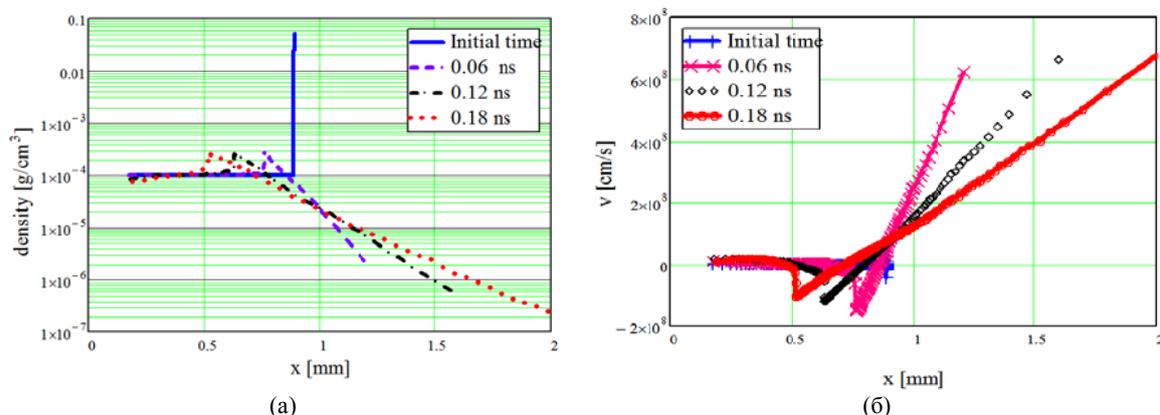


Рисунок 6 - Взаимодействие лазерного излучения с плотной оболочкой материала аблятора: распределение плотности плазмы (б) и скорости плазмы (в) в различные моменты времени

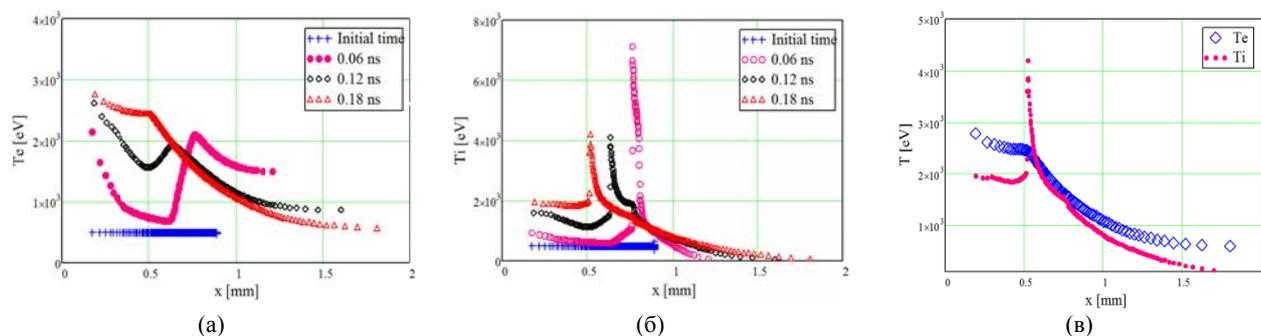


Рисунок 7 - Взаимодействие лазерного излучения с плотной оболочкой материала аблятора: распределение температуры ионов (а), температуры электронов (б) в моменты времени 0.06, 0.12, 0.18 нс и распределение температуры электронов и ионов в момент времени 0.18 нс

Заключение

В работе на основе двухтемпературной одножидкостной гидродинамической модели рассмотрены свойства сгустка плотной горячей плазмы применительно к проблеме инерциального термоядерного синтеза. Приведены уравнения двухтемпературной гидродинамики с учетом электронной теплопроводности, кинетики зарядового состава. Рассмотрены модельные задачи: разлет плазменного сгустка в вакуум, сжатие плазмы ударными волнами, взаимодействие сгустка плазмы с лазерным излучением. На основе разработанных численных методов получены и проанализированы тестовые задачи, возникающие в проблеме инерциального термоядерного синтеза.

Выполненные исследования проведены в рамках НТП №0115PK03029 "НУ-Беркли: стратегическая программа исследования критического состояния вещества, перспективных материалов и источников энергии (2014-2018 г.г.)" МОН РК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фортон В.Е. Физика высоких плотностей энергии. М.: Физматлит, 2013, 712 с.
- [2] Дж. Дюдерштадт, Г.Мозес. Инерциальный термоядерный синтез. М.: Энергоатомиздат, 1984, 304 с.
- [3] Mahdavi M. and Koohrokhi T. Energy deposition of multi-MeV protons in compressed targets of dast-ignition inertial confinement fusion // Physical Review E. - 2012. - Vol. 85. - P. 016405.
- [4] Benedict L.X., Surh M.P., Castor J.I., Khairallah S.A., Whitley H.D., Richards D.F., Glosli J.N., Murillo M S., Scullard C.R., Grabowski P.E., Michta D., and Graziani F.R. Molecular dynamics simulations and generalized Lenard-Balescu calculations of electron-ion temperature equilibration in plasmas // Phys. Rev. E. – 2012. – Vol. 86. – P. 046406.

- [5] Issanova M.K., Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Bastykova N.Kh., Moldabekov Zh.A., Meister C.-V. Classical scattering and stopping power in dense plasmas: the effect of diffraction and dynamic screening // *Laser and Particle Beams*. – 2016. – Vol. 34. – P. 457-466.
- [6] Самарский А.А., Гайфулин С.А., Захаров А.В., Змитренко Н.В. // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, 1983, Т. 2, №13, С.34.
- [7] Зуев А.И. // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1983, Т. 3, №14, С.41.
- [8] Долголева Г.В. // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1983, Т. 2, №13, С.29.
- [9] Зельдович Я.В., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. // М:Наука, 1966, 688 с.
- [10] Годунов С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики. // Матем. сборник, 1959, Т. 47, №89, С.271-306.
- [11] Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Г. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982, 376 с.
- [12] Майоров С.А., Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1986, Т. 26, №11, С. 1735-1739.
- [13] Чарахчян А.А. Об алгоритмах расчета распада разрыва для схемы С.К. Годунова, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 2000, Т. 40, №5, С. 782-786
- [14] Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. - М.: Физматлит, 2001, 205с.

Т.С. Рамазанов¹, С.К. Коданова¹, Н.Х. Бастыкова¹, А. Тихонов², С.А. Майоров³

¹ЭТФФЗИ, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан;

²Ғылым және Технологиялар мектебі, Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан;

³Ресей академия ғылымының жалпы физика институты, Мәскеу, Ресей

ТЫҒЫЗ ЫСТЫҚ ПЛАЗМА ЖИЫНТЫҒЫНЫҢ ГИДРОДИНАМИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аннотация: Бұл жұмыста инерциялық термоядролық синтез проблемасы аясында қолданылатын тығыз ыстық плазманың гидродинамикалық қасиеттері зерттелді. Зарядтық құрылым кинетикасының электронды жылуөткізгіштігін ескере отырып, екітемпературалы гидродинамика теңдеулері келтірілген. Плазмалық шоғырдың вакуумге ұшуы, плазманың қарсы толқындармен сығылуы, электрондық өткізгіштің плазма жйынтығын соққы толқындармен қысқан кездегі рөлі, плазма шоғырының лазерлі сәулелендірумен және ауыр иондар шоғырымен әсерлесуі сияқты модельдік есептер қарастырылған. Жасалған сандық есептеулер әдісі негізінде, инерциялық термоядролық синтез мәселесінен туындайтын, тесттік есептер алынды және талданды. Нәтижелері иондар мен электрондардың массалық қатынасы үлкен болуына байланысты олардың арасындағы энергия алмасу уақыты жоғары болғандықтан сиретудің толқыны соңында электрон температурасы ионның температурасына қарағанда айтарлықтай жоғары екенін көрсетеді. Сондай-ақ, сфералық геометрия жағдайда, соққы толқынының центрге қарай өту барысында, ол бірнеше рет центрге жетіп және аблятор қабатынан шағылыса отырып плазма тығыздығы мен температурасын едәуір артуына алып келеді.

Түйін сөздер: Тығыз ыстық плазма, Гидродинамикалық модель, Соққы толқыны, Екітемпературалы плазма, Инерциялық термоядролық синтез үшін нысаналар, Соққы толқындармен сығу.

МАЗМҰНЫ

<i>Серебрянский А., Рева И., Кругов М., Yoshida Fumi.</i> Фэтон (3200) астероидының фотометрлік талдауларының нәтижелері (ағылшын тілінде).....	5
<i>Ерланұлы Е., Батрышев Д.Ф., Рамазанов Т.С., Габдуллин М.Т., Ахметжанов Н.А., Аханова Н.Е., Омиржанов О.</i> Плазма параметрлерінің көміртекті наноматериалдардың pecvd әдісімен синтезіне әсері (ағылшын тілінде).....	14
<i>Тейфель В.Г., Вдовиченко В.Д., Лысенко П.Г., Каримов А.М., Кириенко Г.А., Филиппов В.А., Харитонова Г.А., Хоженец А.П.</i> Юпитердегі үлкен қызыл дақ: аммиакты жұтылудың кейбір ерекшеліктері (ағылшын тілінде).....	23
<i>Буртебаев Н., Керимкулов Ж.К., Зазулин Д.М., Алимов Д.К., Мухамеджанов Е.С., Курахмедов А.Е., Чункибаева А., Еділбаев Е.Н.</i> Төменгі энергияларда $^{10}\text{B}(\text{p},\alpha)^7\text{Be}$ реакциясын эксперименттік зерттеу (ағылшын тілінде).....	32
<i>Серебрянский А., Серебряков С., Ергешев А.</i> Үлкен ауқымдағы ЗБА-бақылау мәліметтерін фотометрлеу және ағымдық астрометрияның әдіснамасы (ағылшын тілінде).....	37
<i>Минглибаев М. Дж, Шомиекова С.А.</i> Реактивті күшті есепке алып анизатропты айнымалы массадағы екі планеталы үш дене есебінің ұйытқушы функцияның аналитикалық теңдеулері (ағылшын тілінде).....	48
<i>Кондратьева Л.Н., Рыспаев Ф.К., Денисюк Э.К., Кругов М.А.</i> М1-77 планетарлық тұмандықтың жаңа нәтижелері (ағылшын тілінде).....	59
<i>Павлова Л.А., Кондратьева Л.Н.</i> Планетарлық тумандардың біркелкі құрылымын қалыптастыру механизмдері (ағылшын тілінде).....	63
<i>Асанова А.Т., Сабалахова А.П., Толеуханова З.М.</i> Үшінші ретті дербес туындылы дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін бастапқы-шеттік есептің шешімі туралы (ағылшын тілінде).....	67
<i>Кульжумиева А.А., Сартабанов Ж.А.</i> Тұрақты коэффициентті төрт дифференциалдық теңдеулердің сызықты жүйесінің көппериодты шешімінің бар болуының коэффициенттік белгілері (ағылшын тілінде).....	74
<i>Мусабеков А., Сарипбаев А., Куракбаева С., Калбаева А., Исмаилов С., Сатыбалдиева Ф., Мусабеков Н., Аубакирова Т.</i> Айна шоғырландырушы жүйенің қозғалыс теңдеуі мен алгоритмін зерттеу (ағылшын тілінде).....	81
<i>Ақылбаев М.И., Бейсебаева А., Шалданбаев А. Ш.</i> Сингуляр әсерленген Коши есебінің әлді жыйынқталуының кепілдігі (ағылшын тілінде).....	90

* * *

<i>Ерланұлы Е., Батрышев Д.Ф., Рамазанов Т.С., Габдуллин М.Т., Ахметжанов Н.А., Аханова Н.Е., Омиржанов О.</i> Плазма параметрлерінің көміртекті наноматериалдардың PECVD әдісімен синтезіне әсері (орыс тілінде).....	107
<i>Буртебаев Н., Керимкулов Ж.К., Зазулин Д.М., Алимов Д.К., Мухамеджанов Е.С., Курахмедов А.Е., Чункибаева А., Еділбаев Е.Н.</i> Төменгі энергияларда $^{10}\text{B}(\text{p},\alpha)^7\text{Be}$ реакциясын эксперименттік зерттеу (орыс тілінде).....	117
<i>Серебрянский А., Серебряков С., Ергешев А.</i> Үлкен ауқымдағы ЗБА-бақылау мәліметтерін фотометрлеу және ағымдық астрометрияның әдіснамасы (орыс тілінде).....	122
<i>Минглибаев М. Дж, Шомиекова С.А.</i> Реактивті күшті есепке алып анизатропты айнымалы массадағы екі планеталы үш дене есебінің ұйытқушы функцияның аналитикалық теңдеулері (орыс тілінде).....	134
<i>Кондратьева Л.Н., Рыспаев Ф.К., Денисюк Э.К., Кругов М.А.</i> М1-77 планетарлық тұмандықтың жаңа нәтижелері (орыс тілінде).....	144
<i>Павлова Л.А., Кондратьева Л.Н.</i> Планетарлық тумандардың біркелкі құрылымын қалыптастыру механизмдері (орыс тілінде).....	149
<i>Рамазанов Т.С., Коданова С.К., Бастыкова Н.Х., Тихонов А., Майоров С.А.</i> Тығыз ыстық плазма жиынтығының гидродинамикалық қасиеттерін зерттеу (орыс тілінде).....	153

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Серебрянский А., Рева И., Кругов М., Yoshida Fumi.</i> Результаты фотометрического анализа астероида фазтон (3200) (на английском языке)	5
<i>Ерланулы Е., Батрышев Д.Г., Рамазанов Т.С., Габдуллин М.Т., Ахметжанов Н.А., Аханова Н.Е., Омиржанов О.</i> Влияние параметров плазмы на синтез углеродных наноматериалов методом PECVD (на английском языке).....	14
<i>Тейфель В.Г., Вдовиченко В.Д., Лысенко П.Г., Каримов А.М., Кириенко Г.А., Филиппов В.А., Харитонова Г.А., Хоженец А.П.</i> Большое красное пятно на Юпитере: некоторые особенности аммиачного поглощения (на английском языке).....	23
<i>Буртебаев Н., Керимкулов Ж.К., Зазулин Д.М., Алимов Д.К., Мухамеджанов Е.С., Курахмедов А.Е., Чункибаева А., Еділбаев Е.Н</i> Экспериментальное исследование реакции $^{10}\text{B}(\text{p},\alpha)^7\text{Be}$ при низких энергиях (на английском языке).....	32
<i>Серебрянский А., Серебряков С., Ергешев А.</i> Методика потоковой астрометрии и фотометрии большого массива ПЗС-наблюдений (на английском языке).....	37
<i>Минглибаев М.Дж., Шомиекова С.А.</i> Аналитические выражения возмущающих функции в двухпланетной задаче трех тел с анизотропно изменяющимися массами при наличии реактивных сил (на английском языке).....	48
<i>Кондратьева Л.Н., Рспаев Ф.К., Денисюк Э.К., Кругов М.А.</i> Новые результаты исследования планетарной туманности М1-77 (на английском языке).....	59
<i>Павлова Л.А., Кондратьева Л.Н.</i> Механизмы формирования неоднородной структуры планетарных туманностей (на английском языке).....	63
<i>Асанова А.Т., Сабалахова А.П., Толеуханова З.М.</i> О решении начально-краевой задачи для системы дифференциальных уравнений в частных производных третьего порядка (на английском языке).....	67
<i>Кульжумиева А.А., Сартабанов Ж.А.</i> Коэффициентные признаки существования многопериодических решений линейной системы четырех дифференциальных уравнений с постоянными на диагонали коэффициентами (на английском языке).....	74
<i>Мусабеков А., Сарибаев А., Куракбаева С., Калбаева А., Исмаилов С., Сатыбалдиева Ф., Мусабеков Н., Аубакирова Т.</i> Исследование уравнения и алгоритма движения зеркальной концентрирующей системы (на английском языке).....	81
<i>Ақылбаев М.И., Бейсебаева А., Шалданбаев А. Ш.</i> Критерии сильной сходимости решений сингулярно возмущенной задачи Коши (на английском языке).....	90
* * *	
<i>Ерланулы Е., Батрышев Д.Г., Рамазанов Т.С., Габдуллин М.Т., Ахметжанов Н.А., Аханова Н.Е., Омиржанов О.</i> Влияние параметров плазмы на синтез углеродных наноматериалов методом PECVD (на русском языке).....	107
<i>Буртебаев Н., Керимкулов Ж.К., Зазулин Д.М., Алимов Д.К., Мухамеджанов Е.С., Курахмедов А.Е., Чункибаева А., Еділбаев Е.Н</i> Экспериментальное исследование реакции $^{10}\text{B}(\text{p},\alpha)^7\text{Be}$ при низких энергиях (на русском языке).....	117
<i>Серебрянский А., Серебряков С., Ергешев А.</i> Методика потоковой астрометрии и фотометрии большого массива ПЗС-наблюдений (на русском языке).....	122
<i>Минглибаев М.Дж., Шомиекова С.А.</i> Аналитические выражения возмущающих функции в двухпланетной задаче трех тел с анизотропно изменяющимися массами при наличии реактивных сил (на русском языке).....	134
<i>Кондратьева Л.Н., Рспаев Ф.К., Денисюк Э.К., Кругов М.А.</i> Новые результаты исследования планетарной туманности М1-77 (на русском языке).....	144
<i>Павлова Л.А., Кондратьева Л.Н.</i> Механизмы формирования неоднородной структуры планетарных туманностей (на русском языке).....	149
<i>Рамазанов Т.С., Коданова С.К., Бастыкова Н.Х., Тихонов А., Майоров С.А.</i> Исследование гидродинамических свойств сгустка плотной горячей плазмы (на русском языке).....	153

CONTENTS

Serebryanskiy A., Reva I., Krugov M., Yoshida Fumi. Results of photometrical analysis of asteroid (3200) phaethon (in English)..... 5

Yerlanuly Ye., Batryshev D.G., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T., Ahmetzhanov N.E., Ahanova N.E., Omirzhanov O. Effect of plasma parameters on the synthesis of carbon nanomaterials by the pecvd method (in English)..... 14

Teifel V.G., Vdovichenko V.D., Lysenko P.G., Karimov A.M., Kirienko G.A., Filippov V.A., Kharitonova G.A., Hozenets A.P. The great red spot on Jupiter: some features of the ammonia absorption (in English)..... 23

Burtebaev N., Kerimkulov Zh.K., Zazulin D.M., Alimov D.K., Mukhamejanov Y.S., Kurahmedov A.E., Chunkibayeva A., Edilbayev E.N. Experimental study of $^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$ reaction at low energies (in English)..... 32

Serebryanskiy A., Serebryakov S., Ergeshev A. Methodology of pipeline data reduction for astrometry and photometry of a large array of ccd observations (in English)..... 37

Minglibayev M. Zh., Shomshekova S.A. Analytical expressions of the perturbing functions in two planetary three- body problem with masses varyng non-isotropically when available for reactive forces (in English)..... 48

Kondratyeva L.N., Rspaev F.K., Denissyuk E.K., Krugov M.A. New results of study of the planetary nebula M1-77 (in English) 59

Pavlova L.A., Kondratyeva L.N. Mechanisms for forming the inhomogeneous structure of planetary nebulae (in English)... 63

Assanova A.T., Sabalakhova A.P., Toleukhanova Z.M. On the solving of initial-boundary value problem for system of partial differential equations of the third order (in English)..... 67

Kulzhumiyeva A.A., Sartabanov Zh.A. Coefficient criterion of existence of multiperiodic solutions of a linear system of four differential equations with constant coefficients on diagonal (in English)..... 74

Musabekov A., Saribayev A., Kurakbayeva S., Kalbayeva A., Ismailov S., Satybaldieva F., Musabekov N., Aubakirova T. The investigation of equation and algorithm of the mirror concentrating system movement (in English)..... 81

Akylbayev M.I., Beisebayeva A., Shaldanbaev A.Sh. Criteria for strong convergence of solutions singularly of the perturbed Cauchy problem (in English)..... 90

* * *

Yerlanuly Ye., Batryshev D.G., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T., Ahmetzhanov N.E., Ahanova N.E., Omirzhanov O. Effect of plasma parameters on the synthesis of carbon nanomaterials by the pecvd method (in Russian)..... 107

Burtebaev N., Kerimkulov Zh.K., Zazulin D.M., Alimov D.K., Mukhamejanov Y.S., Kurahmedov A.E., Chunkibayeva A., Edilbayev E.N. Experimental study of $^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$ reaction at low energies (in Russian)..... 117

Serebryanskiy A., Serebryakov S., Ergeshev A. Methodology of pipeline data reduction for astrometry and photometry of a large array of ccd observations (in Russian)..... 122

Minglibayev M. Zh., Shomshekova S.A. Analytical expressions of the perturbing functions in two planetary three- body problem with masses varyng non-isotropically when available for reactive forces (in Russian)..... 134

Kondratyeva L.N., Rspaev F.K., Denissyuk E.K., Krugov M.A. New results of study of the planetary nebula M1-77 (in Russian)..... 144

Pavlova L.A., Kondratyeva L.N. Mechanisms for forming the inhomogeneous structure of planetary nebulae (in Russian).. 149

Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Bastykova N.Kh., Tikhonov A., Maiorov S.A. Investigation of hydrodynamic properties of hot dense plasma (in Russian)..... 153

**Publication Ethics and Publication Malpractice
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайтах:

www.nauka-nanrk.kz

<http://www.physics-mathematics.kz>

ISSN 2518-1726 (Online), ISSN 1991-346X (Print)

Редакторы *М. С. Ахметова, Т. А. Апендиев, Д. С. Аленов*
Верстка на компьютере *А. М. Кульгинбаевой*

Подписано в печать 05.06.2018.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
10 п. л. Тираж 300. Заказ 3.

Национальная академия наук РК
050010, Алматы, ул. Шевченко, 28, т. 272-13-18, 272-13-19